

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Природные алмазы России / Под ред. В.Б. Кваскова. – М.: Полярон, 1997. – 304 с.
2. Anthony T.R., Banholzer W.F., Fleischer T.F., et al. Thermal diffusivity of isotopically enriched ^{13}C diamond // Phys. Rev. B. – 1990. – V. 42. – № 2. – P. 1104–1111.
3. Моряков О.С., Квасков В.Б., Горбачев В.В., Зезин Р.Б., Храброва Т.В. Природные алмазы в полупроводниковой электронике // Обзоры по электронной технике. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. – 1988. – В. 4 (1342). – 36 с. – М.: ЦНИИ «Электроника».
4. Моряков О.С. Алмазные теплоотводы в конструкции полупроводниковых приборов // Обзоры по электронной технике. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. – 1982. – В. 1 (857). – 46 с. – М.: ЦНИИ «Электроника».
5. Баранов В.В., Парашук В.В., Рябцев Г.И. и др. Особенности микромонтажа мощных лазерных диодов // Проблемы проектирования и производства РЭС: Сб. матер. V Междунар. научно-техн. конф. (Новополоцк, 29–30 мая 2008). – ПГУ, 2008. – С. 40–44.
6. Рябцев Г.И., Батай Л.Е., Парашук В.В. и др. Теплоотводы на основе искусственных алмазов для мощных лазерных диодов // Lithuanian Journal of Physics. – 1999. – V. 39. – № 4–5. – P. 389–394.

Поступила 08.10.2009 г.

УДК 621.373.826

СКОРОСТНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ МИКРООБЪЕКТОВ ПОСРЕДСТВОМ АКТИВНЫХ СРЕД ЛАЗЕРОВ НА ПАРАХ МЕТАЛЛОВ В УСЛОВИЯХ ЗАСВЕТКИ

Г.С. Евтушенко¹, Ф.А. Губарев^{1,2}, В.Б. Суханов², Д.В. Шиянов², С.Н. Торгаев^{1,2}, М.В. Тригуб^{1,2}

¹Томский политехнический университет

²Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

E-mail: trigub@tpu.ru

Представлен анализ возможности создания и использования активных оптических систем для визуализации макро- и микрообъектов, в условиях внешней (либо собственной) засветки, в том числе в режиме реального времени. Представлены результаты разработки и тестирования макета такой системы с использованием активной среды высокочастотного лазера на парах бромида меди. Визуализирован процесс самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Проведен ряд экспериментов по визуализации биообъектов, в том числе в условиях внешней засветки.

Ключевые слова:

Лазеры на парах металлов, активная оптическая система, высокоскоростной лазерный монитор, лазерный микроскоп.

Key words:

Metal-vapor lasers, active optical system, high-speed resolution laser monitor, laser microscope.

Введение

В настоящее время все более востребованными становятся оптико-электронные системы, способные визуализировать быстротекущие процессы, в том числе экранированные от наблюдателя слоем плазмы. Такие процессы протекают в зоне взаимодействия мощных потоков энергии (лазерное излучение, электронный пучок и т. д.) с веществом, например, при создании наноразмерных структур, лазерной обработке материалов, самораспространяющемся высокотемпературном синтезе. Для наблюдения подобных явлений целесообразно использовать высокоскоростные лазерные мониторы, в которых в качестве оптического усилителя применяются лазеры на самоограниченных переходах металлов, в частности, лазер на парах меди. Выбор данного типа лазеров обусловлен следующими особенностями: работа в видимой области спектра, высокая спектральная яркость, однородность среды, большое усиление и высокая частота следования импульсов генерации [1].

Оптические системы с усилителями яркости

Для создания активных оптических систем (АОС) необходимо применение квантового усилителя, который должен удовлетворять следующим требованиям:

1. Оптическая среда квантового усилителя должна быть оптически однородной для того, чтобы усилитель не вносил искажений в передаваемую информацию.
2. Высокое усиление среды, что позволяет работать без резонатора (режим сверхсвечивости).
3. Геометрические размеры и угловая апертура усилителя должны обеспечивать прохождение световых пучков без потерь оптической информации.
4. Выходная мощность усилителя должна быть достаточной для практического применения (визуальный контроль).
5. Работа активной среды в импульсном режиме.

Впервые активные среды газовых лазеров для создания АОС применены в работе [2], в которой

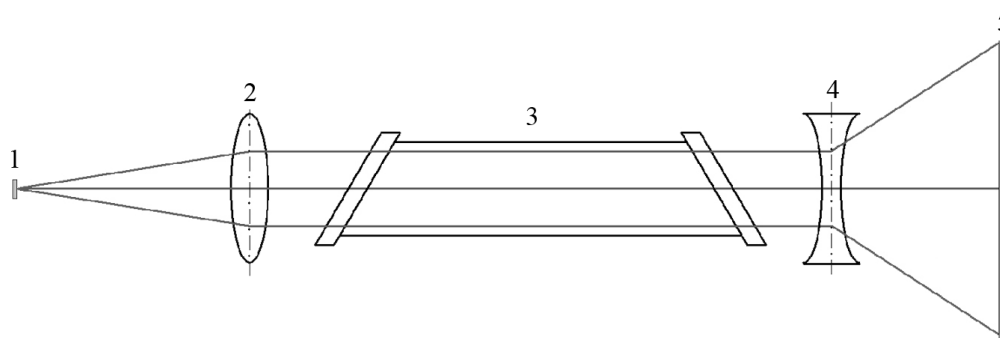


Рис. 1. Схема проекционного лазерного микроскопа: 1) объект наблюдения; 2, 4) линзы, формирующие изображение; 3) оптический усилитель; 5) экран

использовали гелий-неоновый лазер и пары однократно ионизированной ртути в полом катоде. Использование активных сред лазеров на парах металлов в качестве усилителей яркости предложено в работе [3]. Создание усилителя яркости на парах меди стало возможным после того, как в работе [4] был предложен метод саморазогрева, суть которого заключается в использовании для нагрева рабочей зоны активного элемента энергии того же импульса, что используется для накачки лазера.

В работе [5] представлено устройство, позволяющее получать увеличенное и усиленное по яркости изображение объекта на большом экране. Оптический усилитель выполнен на основе лазера на парах меди, работающего в режиме сверхсветимости, с частотой повторения импульсов накачки 10 кГц. Упрощенная схема такого устройства, получившего название лазерного проекционного микроскопа, приведена на рис. 1.

Наблюдение объектов в условиях сильной фоновой засветки

В работе [6] приведены оценки предельных условий, при которых зондирующий луч может пройти через слой плотной высокотемпературной плазмы и сформировать без заметного искажения оптическое изображение объекта. Эффект запирания зондирующего излучения определяется плазменной частотой и проявляется при плотности электронов

$>10^{21} \text{ см}^{-3}$. Поэтому при использовании излучения видимой области спектра, плазма остается оптически тонкой в широком диапазоне параметров [6].

С использованием АОС произведен ряд исследований зон взаимодействия мощного излучения с графитом и пиррографитом [7–9]. Выявлен ряд особенностей, которые было бы невозможно обнаружить другими средствами наблюдения. Следует отметить, что в работе [9] наблюдение процесса осуществлялось в режиме реального времени, благодаря еще одному достоинству этого класса лазеров – импульсно-периодическому режиму генерации коротких импульсов. В результате было создано устройство, названное авторами «лазерный монитор», рис. 2.

Для наблюдения процессов в режиме реального времени с помощью лазерного монитора необходимо увеличивать временное разрешение системы, т. е. увеличивать частоту работы оптического усилителя и использовать высокоскоростные регистраторы. В работах [7–9] максимальная частота следования импульсов накачки лазера на парах меди составляла 16 кГц, что обеспечивало временное разрешение 62,5 мкс.

Для наблюдения ряда процессов, таких как получение наноразмерных структур, анализ самораспространяющегося высокотемпературного синтеза и др., требуются более скоростные системы визуализации.

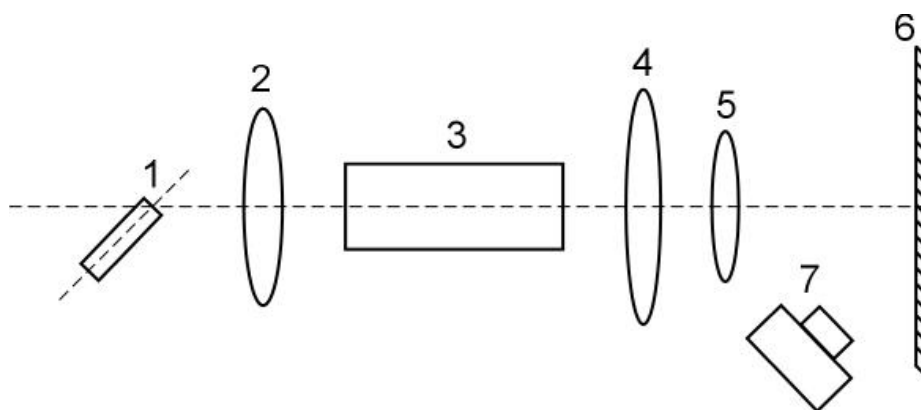


Рис. 2. Схема лазерного монитора: 1) наблюдаемый электрод; 2) линза; 3) усилитель яркости; 4, 5) линзы, формирующие изображение на экране; 6) экран; 7) скоростной регистратор

Активные среды

Характеристики АОС (временное разрешение, усиление и др.) во многом определяются характеристиками используемой активной среды. Сегодня на смену стандартным лазерам на парах металлов приходят лазеры с модифицированной кинетикой [10] — это лазеры, активная среда в которых модифицирована введением активных примесей, что существенно улучшает генерационные характеристики.

В работе [11] представлены усилительные характеристики активной среды лазера на парах бромида меди с добавками водорода и результаты исследований характеристик АОС с усилителями яркости на основе данной среды. При добавках водорода происходит заметное сглаживание распределения эффективного усиления по поперечному сечению активного элемента, что делает активную среду на парах бромида меди с добавками водорода предпочтительной для создания АОС. Максимальная частота следования импульсов генерации для данного типа лазера с активными добавками достигает 400 кГц [12, 13], что открывает возможность создания лазерного монитора с высоким временным разрешением.

Экспериментальные результаты

Как отмечалось выше, активные оптические системы позволяют наблюдать объекты в условиях внешней фоновой засветки. В работе проведен ряд тестовых экспериментов по наблюдению микрообъектов в условия внешней и собственной фоновой засветки, в том числе при высокой частоте следования импульсов накачки оптического усилителя. Схемы экспериментов представлены на рис. 3.

В качестве оптического усилителя использовался активный элемент лазера на парах бромида меди с добавками НВг с частотой следования импульсов возбуждения 50...70 кГц. Регистрация объектов осуществлялась с помощью камеры Casio EX-FH20, с временным разрешением 1 мс. В качестве тест-объектов использованы металлическая сетка с размером отверстий 0,75 мм и дифракционная решетка 600 штр./мм. В качестве внешней засветки использовано пламя свечи.

На рис. 4 показано изображение дифракционной решетки при разном увеличении объектива, полученное в режиме обычного проекционного микроскопа (внешняя засветка отсутствовала). На рис. 5 приведены результаты работы лазерной системы в режиме монитора (в условиях внешней засветки). Видно, что без использования оптического усилителя наблюдение области, засвеченной плазмой невозможно (рис. 5, а). В то же время, при использовании АОС, получаем увеличенное изображение засвеченной области (рис. 5, в), не уступающее по качеству изображению в отсутствии засветки (рис. 5, б). Яркие пятна на рис. 5, б, в, связаны с возникновением генерации вследствие отражения от выходного окна газоразрядной трубки. Оптимизация оптического усилителя позволит избавиться от данного паразитного эффекта.

Следующая серия экспериментов заключалась в визуализации объектов, которые являются источниками фоновой засветки, делающей невозможным наблюдение обычными оптическими системами. Схема эксперимента представлена на рис. 3, б. В качестве тестового эксперимента визуализировался процесс горения бенгальской свечи. На рис. 6 представлены кадры из видеоролика горения свечи, съемка производилась с частотой 1000 кадров/с.

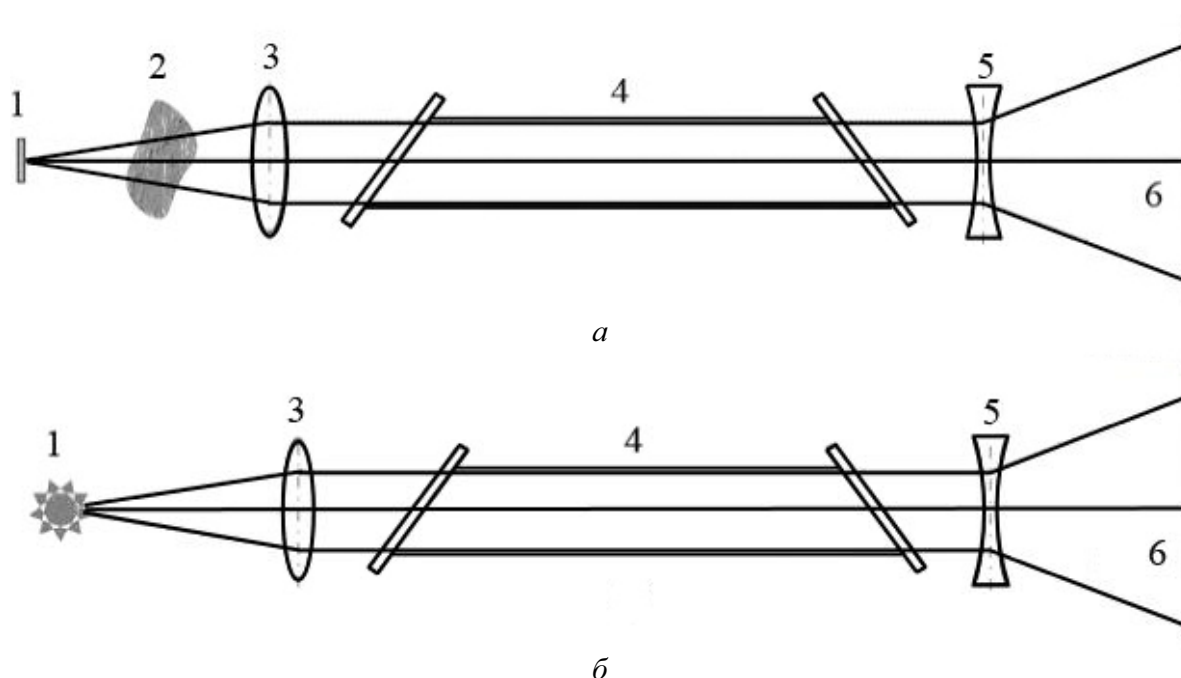


Рис. 3. Схемы экспериментов в условиях внешней фоновой (а) и собственной (б) засветки: 1) объект наблюдения, 2) внешняя засветка, 3), 5) линзы, формирующие изображение на экране, 4) оптический усилитель, 6) экран

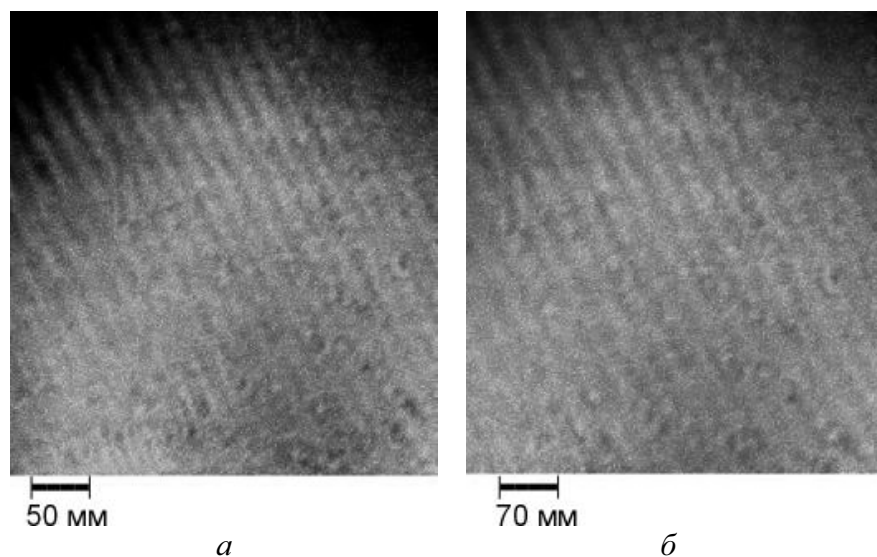


Рис. 4. Дифракционная решетка при различных увеличениях

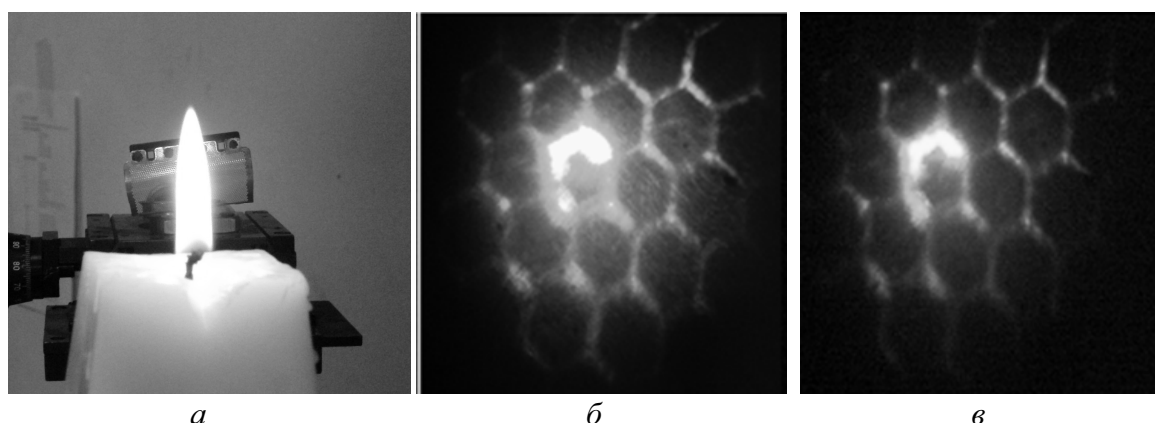


Рис. 5. Тестовый эксперимент: а) внешний вид установки; б, в) изображение объекта на экране без засветки и при внешней засветке

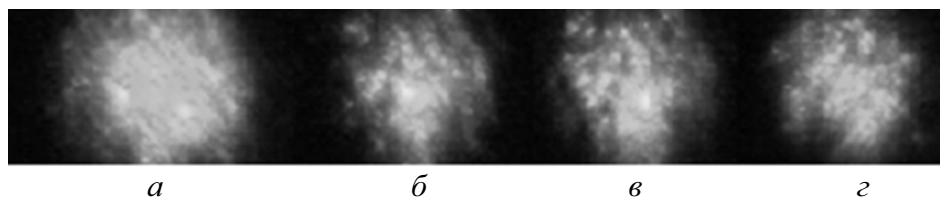


Рис. 6. Тестовый эксперимент: а) начало горения области; б, в) горение; г) остывание свечи

По такой же схеме совместно с сотрудниками отдела макрокинетики ТНЦ СО РАН, г. Томск, А.И. Кирдяшкиным и Р.А. Юсуповым исследован процесс самораспространяющегося высокотемпературного синтеза структуры $\text{FeTiO}_3 + \text{SiO}_2 + \text{Si} + \text{Al} + \text{C}$. На рис. 7 представлены кадры из видеофайла процесса горения данной структуры, полученные как без применения, так и с применением лазерного монитора. В связи с наличием мощной засветки не представляется возможным визуальное наблюдение за изменением структуры непосредственно в момент горения (рис. 7, а). С использованием ла-

зерного монитора с усилителем яркости на основе CuBr-Ne-HBr лазера произведена визуализация данного процесса. Результаты представлены на рис. 7, б, на котором видны характерные моменты процесса — начало горения (0 мс), синтез (155 мс) — процесс горения, для которого характерно наличие жидкой фазы, и кристаллизация (6000 мс).

С использованием схемы, аналогичной представленной на рис. 3, а, производилось наблюдение биообъектов. На рис. 8 представлено изображение мазка цельной крови.

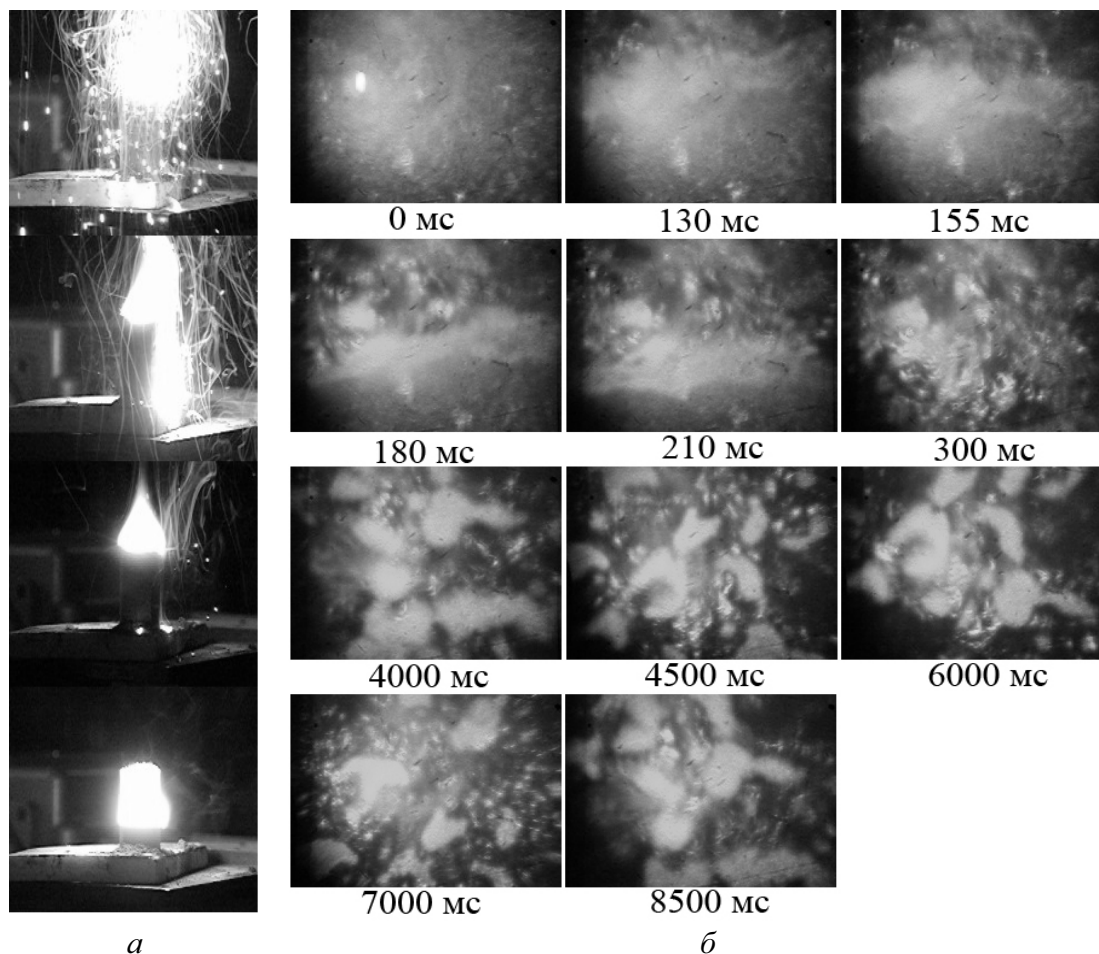


Рис. 7. Процесс горения структуры $\text{FeTiO}_3+\text{SiO}_2+\text{Si}+\text{Al}+\text{C}$: а) видеосъемка; б) визуализация с помощью АОС

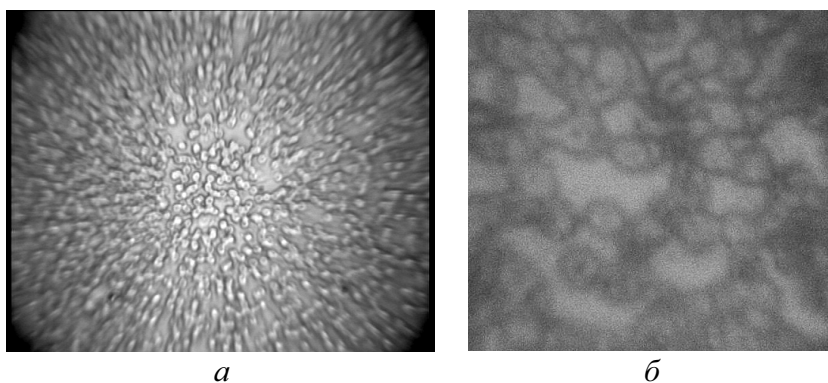


Рис. 8. Изображения мазка цельной крови, полученные с помощью микроскопов: а) «Биолам 10М», б) лазерного проекционного

Качество полученного изображения позволяет производить количественные оценки (степень агрегации и количество эритроцитов на единицу площади) и не уступает изображению, получаемому при использовании стандартного микроскопа («Биолам 10М»).

В качестве следующего объекта наблюдения, с присутствием внешней засветки, использовалась клетка кожицы лука. Засветка осуществлялась излучением He-Ne лазера средней мощностью 3 мВт с диаметром пучка 1,5 мм (рис. 9, в).

Как видно на рис. 9, в, внешняя засветка не влияет на качество получаемого изображения, что позволит в дальнейшем производить детальное наблюдение за изменениями в биотканях при воздействии низкоэнергетического лазерного излучения в режиме реального времени.

Заключение

Использование лазеров на парах галогенидов металлов, в частности, на парах бромиды меди в ка-

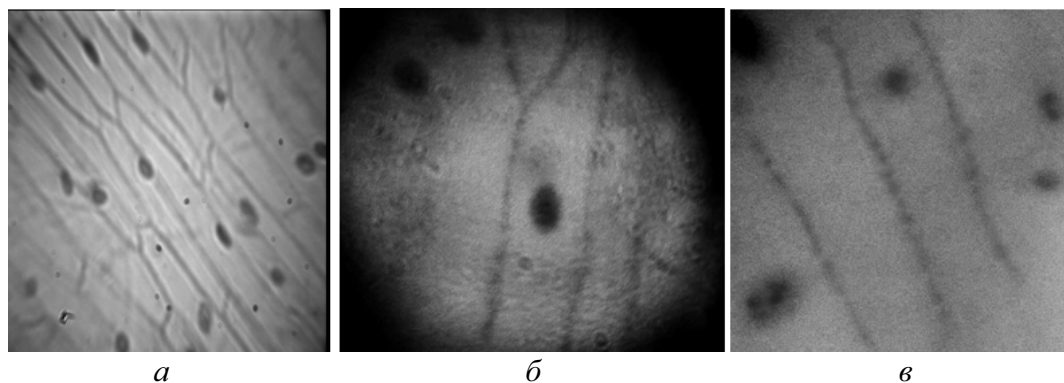


Рис. 9. Фотографии клетки кожицы лука: а) микроскоп «Биолам 10М»; б, в) активная оптическая система без засветки и при облучении He-Ne лазером

честве оптического усилителя для создания активных оптических систем, позволяет существенно расширить область применения лазерных мониторов и лазерных проекционных микроскопов.

В режиме проекционного микроскопа получены увеличенные изображения биообъектов, что свидетельствует о возможности наблюдения живых клеток без их деструкции. Высокая частота следования импульсов накачки оптического усилителя позволяет получать изображение высокого качества. Наличие внешней засветки не влияет на качество полученного изображения.

В режиме лазерного монитора на примере самораспространяющегося высокотемпературного синтеза показано, что в условиях фоновой засветки

удается визуализировать быстротекущие процессы для их дальнейшего исследования.

Впервые в качестве оптического усилителя использован лазер с частотой следования импульсов генерации 70 кГц, что делает возможным создание системы с временным разрешением до 14 мкс.

Использование лазера с высокими частотами следования и современных скоростных фоторегистраторов позволит улучшить временное разрешение системы (до единиц мкс) и расширить область применения активных оптических систем.

Работа выполнена при поддержке АБЦП «Развитие научного потенциала высшей школы», проект № 2.1.2/1425 и частично представлена на XIII Всероссийской конференции «Диагностика высокотемпературной плазмы», Звенигород, 8–13 июня 2009 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пасманик Г.А., Земсков К.И., Казарян М.А. и др. Оптические системы с усилителями яркости. – Горький: ИПН АФ СССР, 1988. – 173 с.
2. Hardy W.A. Active images formation in lasers // IBM J. Res. and develop. – 1965. – V. 9. – № 1. – P. 31–35.
3. Rabinovitz P., Chimenti R. Short communication // J. of the Optical Society of America. – 1970. – V. 60. – № 3. – P. 1577–1582.
4. Исаев А.А., Казарян М.А., Петраш Г.Г. Эффективный импульсный лазер на парах меди с высокой средней мощностью генерации // Письма в ЖЭТФ. – 1972. – Т. 16. – № 1. – С. 40–42.
5. Земсков К.И., Исаев А.А., Казарян М.А., Петраш Г.Г. Лазерный проекционный микроскоп // Квантовая электроника. – 1974. – Т. 1. – № 1. – С. 14–15.
6. Абросимов Г.В., Польский М.М., Саенко В.Б. Использование лазерной среды для фотографирования поверхности, закрытой слоем плазмы // Квантовая электроника. – 1988. – Т. 15. – № 3. – С. 640–646.
7. Батенин В.М., Глина В.Ю., Климовский И.И., Селезнева Л.А. Применение оптических систем с усилителями яркости для исследования поверхностей электродов из графита и пирографита во время горения дуги // Техника высоких температур. – 1991. – Т. 29. – № 6. – С. 1204–1210.
8. Асиновский Э.И., Батенин В.М., Климовский И.И., Марковец В.В. Исследование областей замыкания тока на электродах слаботочной угольной дуги с помощью лазерного монитора // Техника высоких температур. – 2001. – Т. 39. – № 5. – С. 794–808.
9. Абрамов Д.В., Галкин А.Ф., Жаренова С.В., Климовский И.И., Прокошев В.Г., Шаманская Е.Л. Визуализация с помощью лазерного монитора взаимодействия лазерного излучения с поверхностью стекло- и пироуглерода // Известия Томского политехнического университета – 2008. – Т. 312. – № 2. – С. 97–101.
10. Little C.E. Metal Vapor Lasers: Physics, Engineering & Applications. – Chichester (UK): John Wiley & Sons Ltd., 1998. – P. 620–624.
11. Астаджов Д.Н., Вучков Н.К., Земсков К.И., Исаев А.А., Казарян М.А., Петраш Г.Г., Саботинов Н.В. Активные оптические системы с усилителем на парах бромида меди // Квантовая электроника. – 1988. – Т. 15. – № 4. – С. 716–719.
12. Евтушенко Г.С. Лазеры на парах металлов и их галогенидов с высокими частотами следования // Наука – производству. – 2003. – № 9 (65). – С. 51–54.
13. Губарев Ф.А., Федоров В.Ф., Евтушенко Г.С., Суханов В.Б., Заикин С.С. Лазер на парах бромида меди с частотой следования импульсов 400 кГц // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 312. – № 2. – С. 106–107.
14. Евтушенко Г.С., Губарев Ф.А., Суханов В.Б., Шиянов Д.В., Тригуб М.В. Скоростные мониторы на основе лазеров на парах металлов с модифицированной кинетикой // Диагностика высокотемпературной плазмы. Докл. XIII Всерос. конф. – Звенигород, 8–13 июня 2009 г. – Троицк: ГНЦ РФ ТРИНИТИ, 2009. – С. 69–70.

Поступила 01.10.2009 г.